

# PENGARUH KONSENTRASI Cu PADA PROSES PEMBEKUAN SEARAH TERHADAP SIFAT MEKANIS PADUAN Al-Cu

Sugeng Slamet<sup>1</sup>

## ABSTRACT

*The objective of this research are to study the influence of Cu concentration on Al-Cu Alloy toward columnar microstructure and mechanical properties to pass unidirectional solidification process with free convection method.*

*Al-( 2,2; 3,1; 4,4; and 4,7wt%Cu) in hypoeutectic alloy, were melted in the crucible furnace up to 700 °C and poured in the die mold stainless steel ( 100 mm length and in diameter 5 mm ). Unidirectional solidification was done with remelting Al-Cu in die mold that gave 7 mm in thick clay isolation, it used electric furnace up to 700 – 710 °C. Cooling process was done with water over chiller metal lighted under die mold. Material was tested namely microstructure, hardness and tensile strength test.*

*The result shows that the mechanical properties ( tensile strength and hardness test ) increase on raw material and unidirectional solidified for all Cu concentration. Al-4,4wt%Cu have the highest tensile strength and hardness than Al-(2,2; 3,1 and 4,7wt%Cu). It is also influenced magnesium and silicon elements in the alloy.*

**Keywords:** unidirectional solidification, free convection, mechanical propertis.

## ABSTRAK

*Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mempelajari pengaruh konsentrasi Cu pada campuran Al-Cu terhadap struktur mikro dan sifat mekanik kolumnar melalui proses pembekuan searah dengan metode konveksi bebas.*

*Al-(2,2, 3,1, 4,4, dan 4,7% wt Cu) dalam paduan hypoeutectic, dicairkan dalam wadah tungku sampai 700 0C dan dituangkan dalam cetakan stainless steel (panjang 100 mm dan dalam diameter 5 mm). solidifikasi Unidireksional dilakukan dengan remelting Al-Cu dalam cetakan mati yang memberi 7 mm dalam isolasi tanah liat yang tebal, maka digunakan tanur listrik sampai dengan 700-710 °C. Proses pendinginan dilakukan dengan air melalui logam chiller yang disinari di bawah cetakan. Bahan diuji yaitu mikro, kekerasan dan uji kekuatan tarik.*

*Hasil penelitian menunjukkan bahwa sifat mekanik (kekuatan tarik dan uji kekerasan) kenaikan bahan baku dan searah dipadatkan untuk semua konsentrasi Cu. Al-4, 4wt% Cu memiliki kekuatan tarik dan kekerasan tertinggi dari Al-(2,2, 3,1 dan 4,7 wt% Cu). Hal ini juga dipengaruhi unsur-unsur magnesium dan silikon dalam campuran*

**Kata kunci:** solidifikasi searah, konveksi bebas, properti mekanis.

---

<sup>1</sup> Staf Pengajar Fakultas Teknik Universitas Muria Kudus

## PENDAHULUAN

Penelitian di bidang material teknik telah berkembang sangat pesat. Berbagai upaya telah dilakukan untuk mendapatkan material yang mempunyai sifat-sifat mekanis seperti kekuatan, kekerasan dan ketahanan aus yang optimal untuk aplikasi tertentu. Perbaikan sifat mekanis suatu bahan dapat dilakukan melalui beberapa cara baik melalui perlakuan panas, pengerasan endapan maupun rekayasa pembekuan ( Amstead, 1989).

Rekayasa dengan metode pembekuan searah adalah proses untuk meningkatkan terbentuknya *dendrite arm spacing* dan menurunkan kekasaran butir terutama pada daerah *hypoeutectic* (Oakwood dkk, 2002) serta mengarahkan pertumbuhan butir menjadi searah (*columnar*) dengan mengatur laju aliran kalor (Smith dkk,1967; Campbell,1991). Metode ini dapat meningkatkan sifat mekanis material dalam hal ketangguhan, kekuatan tarik dan kekuatan mulur (Axmann, 1983; Piwonka,1992; Kim,dkk,2000).

Aluminium murni memiliki kekuatan dan sifat mekanis yang rendah, maka untuk memperbaiki sifat-sifat mekanisnya harus dipadu dengan unsur lainnya. Penambahan tembaga pada paduan Al-Cu akan memperbaiki kekuatan dan kekerasan baik dengan proses cor ataupun perlakuan panas. Aluminium dengan penambahan konsentrasi 4% sampai dengan 6% tembaga akan meningkatkan kekuatan terhadap perlakuan panas. Di sisi lain, penambahan tembaga pada paduan Al-Cu akan menurunkan ketahanan korosi, ketahanan retak panas (*hot tear*), mengurangi keuletan bahan dan menurunkan mampu cor paduan (Rooy,1992 ; Malau, 2000).

Paduan Al-Cu digunakan untuk konstruksi keling, konstruksi badan pesawat terbang, *frame window*, dan baling-baling kapal. Untuk aplikasi khusus pada bagian komponen mesin yang berputar seperti sudu-sudu (*blades*) turbin gas sangat dibutuhkan orientasi butir searah sehingga mampu menahan beban aksial, tahan terhadap temperatur tinggi dan memiliki kekuatan mulur yang tinggi. Banyaknya batas butir dan orientasi butir yang acak (*equiaxed*) akan mengurangi kekuatan material logam pada temperatur tinggi ( Piwonka, 1992).

## TINJAUAN PUSTAKA

Beberapa penelitian tentang pembekuan searah dilakukan dengan metode pembekuan Bridgman ( Stone dkk, 1998; Gunduz dkk, 2001; Roviglione dkk, 2002; Oakwood dkk, 2002; dan Amauri dkk, 2002). Metode ini cukup sederhana untuk mengamati daerah pembekuan, kecepatan, dan pengukuran parameter yang terkait seperti gradien temperatur pada cairan dan kenaikan temperatur pada setiap fasa. Pembekuan Bridgman menggunakan tabung refraktori yang di dalamnya ditempatkan cetakan dari bahan silikon karbid (SiC). Temperatur

operasional metode pembekuan Bridgman adalah di bawah  $850^{\circ}\text{C}$  dan didinginkan secara lambat dengan menggunakan fluida air.

Metode lain yang dikembangkan adalah proses pembekuan searah konveksi alami (Fredriksson, 1981; Gonzales dan Rappaz, 2006). Pembekuan konveksi alami menggunakan cetakan dari logam stainless steel dengan diameter 50 mm dan panjang 100 mm yang dilapisi bahan keramik boron nitrid setebal 0,8 mm. Metode pendinginannya menggunakan air yang disemprotkan (*water jet spray*) pada bagian bawah cetakan.

Besarnya laju pembekuan sangat menentukan struktur butir yang terbentuk. Penurunan laju pembekuan dapat meningkatkan pertumbuhan butir kolumnar-dendrit (Smith dkk, 1967; Gunduz dkk, 2001; Oakwood dkk, 2002).

Konsentrasi unsur pada paduan akan mempengaruhi pembentukan struktur butir dendrit. Pada paduan Al-Cu perubahan struktur dendrit akan mulai berpengaruh pada temperatur 973 K. Konsentrasi Zn yang rendah ( $<30\%$  berat) pada paduan Al-Zn, lebih sulit terbentuk struktur butir dendrit pada daerah eutektik (Gonzales dan Rappaz, 2006).

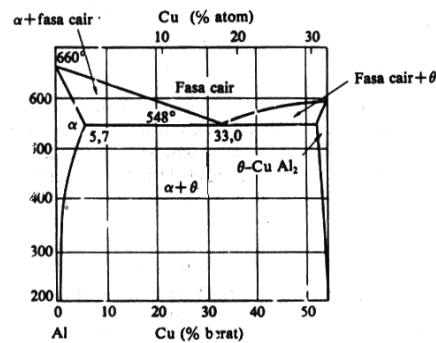
Pengaruh gradien temperatur ( $G$ ) dan laju pembekuan ( $V$ ) yang rendah pada masing-masing konsentrasi akan meningkatkan *primary dendrite arm spacing* ( $\lambda_1$ ), *secondary dendrite arm spacing* ( $\lambda_2$ ), *dendrite tipe radius* ( $R$ ), dan *mushy zone depth* ( $d$ ) (Kou, 1987; Gunduz dkk, 2001).

Proses pembekuan searah akan meningkatkan sifat mekanis material seperti : kekuatan tarik, kekuatan mulur, *elongation*, (Axmann, 1983; Piwonka, 1992; Kim, dkk, 2000) dan kekuatan bending (Smith dkk, 1967).

## LANDASAN TEORI

Al-Cu adalah kombinasi dari logam aluminium yang mempunyai sifat ringan, tahan korosi, mudah dimesin, dengan tembaga yang mempunyai sifat penghantar listrik yang baik, keuletan yang tinggi dan juga sifat tahan korosi (Surdia dan Saito, 1992).

Paduan Al-Cu dapat digolongkan dalam tiga jenis yaitu *hypoeutectic*, *eutectic* dan *hypereutectic*.



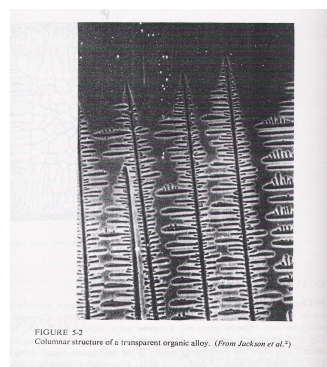
**Gambar 1.** Diagram fase binary Al-Cu (Surdia dan Saito, 1992).

Gambar 1. menunjukkan paduan Al-Cu dengan komposisi tembaga < 33% disebut *hypoeutectic*. Titik *eutectic* pada paduan Al-Cu terdapat pada kandungan Cu sebesar 31,9 sampai 32,9%. Sedangkan kandungan tembaga >33,0% disebut *hypereutectic* ( Murray, 1985).

Proses pembekuan logam terjadi melalui mekanisme pengintian dan pertumbuhan, juga terjadi proses difusi dimana terjadi pergerakan atom-atom di dalam larutan. Proses difusi ini dipengaruhi oleh adanya komposisi larutan dan juga temperatur (Hill dkk, 1994).

Bentuk butir dan ukurannya sangat tergantung pada pertumbuhan butir selama proses pembekuan. Meski besar butir dinyatakan dalam ukuran diameter, sangat sedikit sekali butiran logam fasa tunggal yang bentuknya bulat. Bentuk butir lain adalah bentuk pipih, kolumnar dan dendritik (Van Vlack dan Sriati, 1983).

Selular dendrit terjadi bila gradien temperatur berkurang dan luas daerah pendinginan superkomposisi semakin dominan, karakteristiknya akan berubah menjadi struktur dendrit. Bentuk selular dengan ujung semi-lingkaran akan berubah menjadi struktur dendrit dengan ujung berbentuk piramid dan bahkan berbentuk kubah. Secara keseluruhan struktur selular dendrit membentuk cabang dari jaring-jaring yang saling berhubungan satu dan lainnya.



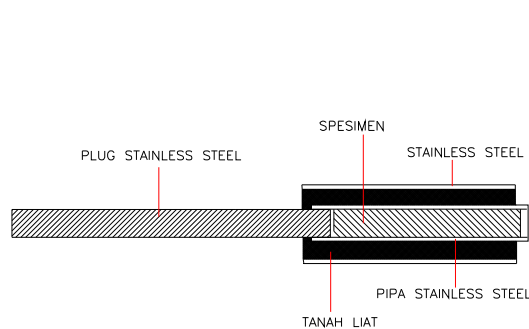
**Gambar 2.** Struktur kolumnar dendrit ( Sindo Kou,1987)

Kolumnar-dendrit merupakan bentuk butir kristal yang menyerupai cabang pohon. Struktur kolumnar-dendrit ditunjukkan pada Gambar 2.

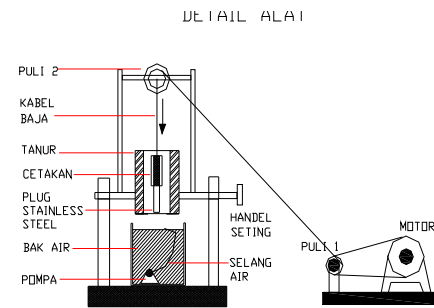
## CARA PENELITIAN

### Bahan dan Alat penelitian

Material yang digunakan adalah paduan Al- ( 4,4 dan 4,7%Cu) sebagai *master alloy*. Peralatan yang digunakan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3



**Gambar 3a.** Cetakan logam dan isolasi tanah liat.



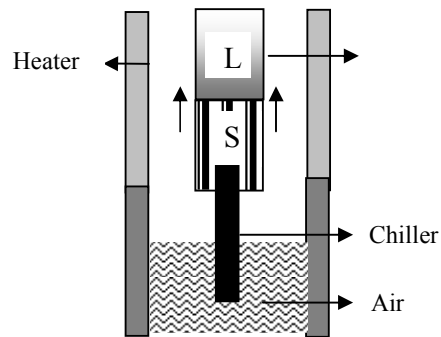
**Gambar 3b.** Peralatan untuk proses pembekuan searah

Pengujian spesimen dilakukan dengan membandingkan struktur mikro yang terbentuk pada masing-masing konsentrasi. Pengujian sifat mekanis selain dilakukan dengan membandingkan nilai kekerasan dan kekuatan tarik pada material awal dengan hasil pembekuan searah juga pada masing-masing konsentrasi Cu.

### Pembekuan searah konveksi alami (*free convection*)

- Pembekuan dilakukan dengan metode konveksi alami sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.
- Membuat paduan Al-(2,2 dan 3,1%Cu) dengan cara menurunkan kandungan tembaga pada material awal Al- 4,7%Cu dengan menambahkan Al 99% dengan metode perbandingan berat.
- Melakukan uji komposisi setiap paduan Al-Cu sesuai konsentrasi Cu yang diinginkan.
- Melebur setiap material uji tersebut dalam dapur *crucibel* dan diukur temperturnya sampai 700 °C. Selanjutnya dituang dalam cetakan logam dengan diameter dalam 6 mm, diameter luar 7 mm dan panjang 100 mm.
- Membuat spesimen pembekuan searah dengan cara melapisi cetakan dengan tanah liat setebal 7 mm dan ditutup dengan slop pipa *stainless steel*, di bagian bawah cetakan ditutup plug *stainless steel* panjang 200 mm yang sekaligus berfungsi sebagai *chill*.
- Melakukan peleburan kembali dalam dapur listrik sampai temperatur 700-710 °C.

- g. Melakukan proses pendinginan dengan jalan mencelup sebagian plug/*chill stainless steel*  $\pm 5$  cm kedalam bak air sehingga terjadi mekanisme penurunan gradien temperatur, dimana logam cor di dalam cetakan mengalami laju pendinginan lambat. Dari hasil perhitungan laju aliran kalor konveksi alami sebesar 9643,26 Kj/s. Untuk menjaga temperatur air agar tetap stabil pada bak pendingin dipasang pompa air.
- h. Mematikan semua sumber panas dalam dapur listrik dan melakukan penahanan pendinginan selama 10 menit atau dengan cara mengukur temperatur dapur listrik mencapai  $\pm 548$  °C.
- i. Memotong melintang sepanjang 60 mm dan membujur dengan diameter 5 mm, untuk specimen uji kekerasan dan mikrostruktur. Sementara untuk pengujian tarik dilakukan dengan membubut cetakan sekaligus untuk dibuat spesimen sesuai ASTM B 557M.
- j. Melakukan pembahasan didasarkan pada mikro struktur yang terbentuk, uji kekerasan dan uji tarik pada masing-masing konsentrasi paduan Al-Cu.



**Gambar 4.** Mekanisme pembekuan searah konveksi alami

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Komposisi kimia

Al-(4,4 dan 4,7%Cu) sebagai master alloy dalam bentuk ingot dipotong ukuran 2 x 2 cm untuk specimen uji komposisi. Tabel 4.1 menunjukkan hasil uji komposisi *master alloy* Al-(4,4 dan 4,7%Cu).

**Tabel 1.** Komposisi kimia paduan (%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Ni	Pb	Sn	Al
0,46	0,098	4,45	0,000	0,498	0,035	0,003	0,047	0,0003	0,004	0,008	94,39
0,12	0,1468	4,767	0,0135	0,0071	0,0868	0,0085	0,0082	0,0013	0,0039	0,0089	94,83

Sedangkan pembuatan paduan Al-Cu dengan beberapa konsentrasi dilakukan dengan menambahkan Al 99% dalam *master alloy* Al-4,7%Cu dengan perbandingan prosen berat.

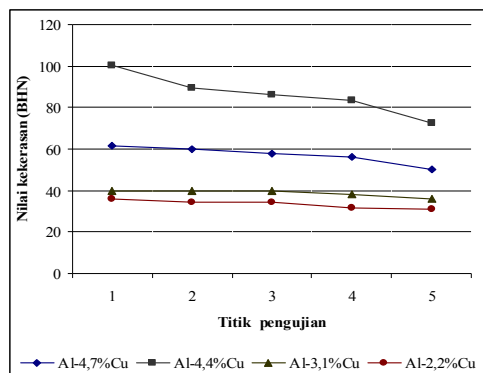
Tabel 4.2 menunjukkan komposisi paduan Al-(2,2 dan 3,1%Cu) setelah dilakukan uji dengan *spectrometer*.

**Tabel 2.** Komposisi kimia paduan (%)

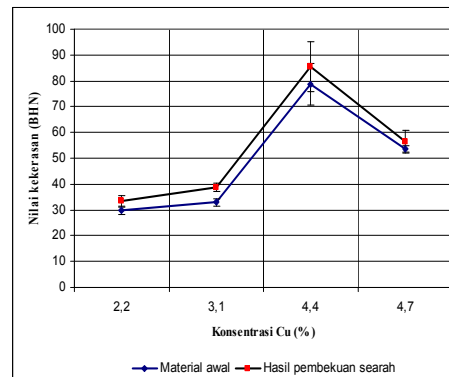
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Ni	Pb	Sn	Al
0,1	0,224	2,22	0,009	0,005	0,065	0,015	0,004	0,0008	0,002	0,004	97,35
0,12	0,287	3,19	0,009	0,006	0,071	0,015	0,006	0,0014	0,004	0,008	96,28

### Nilai kekerasan

Hasil nilai kekerasan yang dilakukan pada potongan membujur berdasar titik pengujian, menunjukkan terjadi penurunan nilai kekerasan dari pangkal hingga ke atas cetakan akibat makin cepatnya laju pendinginan. Paduan Al-4,4% Cu menurun nilai kekerasannya sebesar 7,73%, Al-4,7% Cu menurun nilai kekerasannya 5,07%, sedangkan Al-3,1% dan 2,2 % Cu nilai kekerasannya relatif stabil dari dasar hingga atas cetakan. Gambar 5. menunjukkan hubungan antara titik pengujian dari pangkal ke atas cetakan terhadap nilai kekerasan paduan.



**Gambar 5.** Nilai kekerasan Al-Cu dari pangkal hingga jarak 60 mm



**Gambar 6.** Nilai kekerasan paduan Al-Cu arah membujur

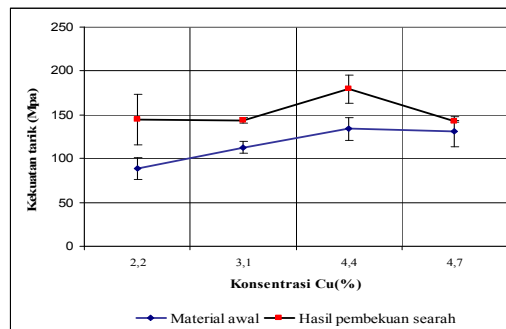
Nilai kekerasan hasil pembekuan searah yang dilakukan pada spesimen yang dipotong membujur sepanjang 60 mm ditunjukkan pada Gambar 6. Pada gambar tersebut memperlihatkan peningkatan kekerasan pada semua konsentrasi Cu.

Material awal Al-4,4%Cu menunjukkan peningkatan nilai kekerasan yang relatif besar mencapai 58,24% dibanding Al-3,1%Cu, hal ini disebabkan adanya konsentrasi magnesium yang relatif besar sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1.

### Kekuatan tarik

Gambar 7. memperlihatkan dengan jelas hubungan antara konsentrasi Cu (%) dengan kekuatan tarik, dimana kekuatan tarik dari paduan berbanding lurus dengan nilai

kekerasannya. Konsentrasi Cu akan meningkatkan kekuatan tarik paduan lebih tinggi dari kekuatan tarik material awalnya.

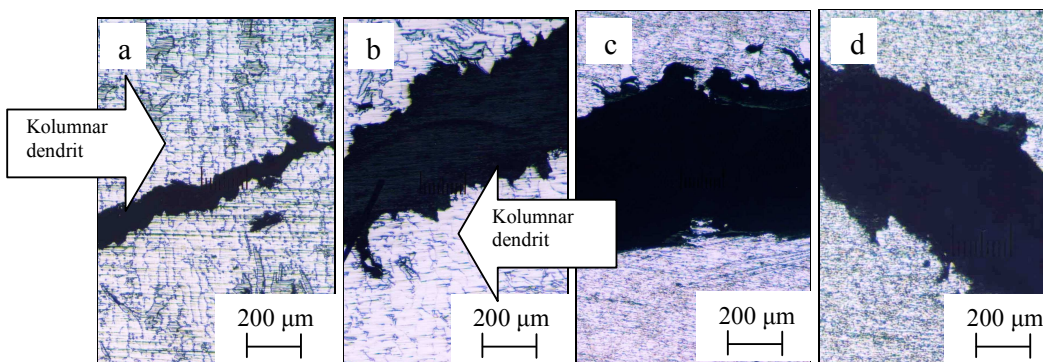


**Gambar 7.** Hasil uji tarik paduan Al-Cu

Hasil pengujian tarik yang dilakukan menunjukkan bahwa struktur hasil pembekuan searah butir kolumnar-dendrit pada paduan Al-Cu akan meningkatkan kekuatan mekanis (Kim, dkk, 2000; Axmann, 1983).

### Struktur mikro patahan tarik

Gambar 8 (a) dan (b) memperlihatkan terjadinya patahan tarik pada struktur mikro kolumnar dendrit. Paduan Al-(2,2 dan 3,1%Cu) terjadinya patahan akibat beban tarik disebabkan pengkasaran butir dan segregasi. Sementara patahan tarik paduan Al-(4,4 dan 4,7%Cu) terjadi pada daerah dimana adanya pengumpulan segregasi di sekitar butir kolumnar dendrit.



**Gambar 8.** Bentuk patahan tarik pembekuan searah (a) 4,7%Cu, (b) 4,4%Cu, (c) 3,1%Cu, (d) 2,2%Cu.

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

1. Konsentrasi Cu mempengaruhi terbentuknya struktur mikro paduan Al-Cu. Al-(4,4 dan 4,7 %Cu) menunjukkan struktur mikro kolumnar, sedangkan Al-(3,1 dan 2,2 %Cu) sulit terbentuk struktur butir kolumnar, hanya menyebabkan perbesaran ukuran



butir dan segregasi pada batas butir. Luas *primary dendrit* menurun seiring penurunan konsentrasi Cu dan semakin tingginya laju pendinginan dari pangkal cetakan, sementara *secondary dendrit arm spacing* meningkat pada paduan Al-(4,4 dan 4,7%Cu).

2. Konsentrasi Cu juga mempengaruhi sifat mekanis paduan. Proses pembekuan searah meningkatkan sifat mekanis paduan dari material awal pada semua variasi konsentrasi Cu. Paduan Al-4,4%Cu hasil pembekuan searah menunjukkan peningkatan kekerasan yang tinggi 85,41 BHN dan kekuatan tarik sebesar 179,28 MPa. Peningkatan kekerasan dan kekuatan tarik Al-4,4%Cu juga disebabkan adanya unsur magnesium dan silikon yang relatif besar. Penambahan konsentrasi 4,7%Cu menyebabkan peningkatan segregasi yang dapat menyebabkan penurunan sifat mekanisnya.

### Saran

1. Semua proses dan mekanisme pembekuan searah, sebaiknya dilakukan dalam satu dapur listrik secara utuh. Sehingga dapat diminimalisir masuknya unsur pengotor baik dari bahan bakar dan lingkungan ke dalam logam cor.
2. Untuk mendapatkan laju pembekuan pada setiap titik pembekuan sepanjang cetakan sebaiknya digunakan data akuisisi temperatur.
3. Variasi konsentrasi Cu pada paduan dikembangkan lagi pada interval yang lebih pendek, untuk mendapatkan fenomena struktur mikro paduan yang lebih akurat.
4. Prosedur komposisi tiap-tiap unsur dalam paduan sebaiknya mempunyai kedekatan nilai untuk mendapatkan keakurasian data sifat mekanis.

## DAFTAR PUSTAKA

- Axmann, W., 1983, "Dynamic Directional Solidification", Workshop RWTH Aachen, pp.71-95.
- Amstead, B.H dkk., 1989, "Teknologi Mekanik" edisi 7, Erlangga, Jakarta, pp.156-157.
- Amauri, G., dkk, 2002, "Theoretical – Experimental Analysis of Cellular and Primary Dendritic Spacing during Unidirectional Solidification of Sn-Pb Alloys ", UNICAMP 13083-970 Campinas - SP, Brazil.
- Campbell, J., 2000, "Castings", University of Birmingham, pp. 125 – 138.
- Fleming, M.C., 1974, "Solidification processing", Mc Graw-Hill Book Company, New York, pp.181-183.
- Fredriksson, H., 1981, "Influence of Free Convection On Dendritic Growth, RWTH Aachen, Lausanne, pp.138-168.
- Gonzales, F., dan Rappaz, M., 2006, "Dendrite Growth Directions in Aluminium-Zinc Alloys ", Lausanne- Switzerland, pp.2797-2806.
- Gunduz, M., and Cadirh, E., 2001,"Directional solidification of Aluminium-Copper alloys,"Elsevier, pp.167-185.
- Kim, M.H., Jung, C.H., dkk, 2000, "The Effects of Ti and Sr on the Microstructures of Al-11,3 wt.%Si Alloys Produced by Ohno Continuous Casting", Volume 6, Metals and Materials Korea, pp. 235-240.
- Kurz, W., 1981, "Dendritenwachstum Bei Gerichteter Erstarrung Von Legierungen Spitzenwachstum Und Primarabstand ", RWTH Aachen, Lausanne, pp.57-72.
- Murray, J.L., 1985, "Binary Alloy Phase Diagrams", Int.Met.Rev.Trans. Metal.Soc.AIME.
- Malau, V., 2000,"Bahan Teknik", Teknik Mesin UGM, Yogyakarta pp.19-23.
- Oakwood, T.G., Goodrich, G.M., 2002, "Role of Gravity Forces on the Directional Solidification of Gray Cast Iron", American Foundry Society,USA, pp.1-17.
- Piwonka, S., 1992, "Aluminum and Aluminum Alloys", Volume 15, Ninth edition, ASM Handbook, USA.pp.700-705.
- Robert, E., Reed-Hill, Reza Abbaschian,1994, "Physical Metallurgy Principles", Third Edition, PWS Publishing Company, Boston, pp.168 dan 421-439.
- Rooy, E.L., 1992, "Aluminum and Aluminum Alloys", Volume 15, Ninth edition, ASM Handbook, USA, pp.1631-1634.
- Roviglione, A.N., and Hermida, J.D., 2002, "A New Directional Solidification Method to Study Gray Cast Iron ", Universidad de Buenos Aires (UBA), Argentina, pp.235.
- Smith, L., and Beeley, P.R., 1967,"Controlled directional solidification of steel,"Leeds University, pp.330-333.
- Sindo Kou, 1987,"Welding Metallurgy", John Wiley and Sons,Wisconsin, pp.129-140.
- Surdia dan Saito, S., 1992, "Pengetahuan bahan teknik", P.T. Pradnya Paramitha, Jakarta, pp. 135.
- Stone, I.C., Jones.H., 1998, "Improved techniques for the production of remelt feedstock for Bridgman directional solidification of aluminium alloys",Chapman&Hall, pp.19-21.

Van Vlack, H., Lawrence, dan Djaprie, S.,1983,” Ilmu dan Teknologi Bahan “, Erlangga, Jakarta, pp.225-231.